

# 北アルプス山岳地積雪の化学組成の地域分布

遠山 和大<sup>1)</sup>、鶴田 元気<sup>2)</sup>、佐竹 洋<sup>2)</sup>、川田 邦夫<sup>3)</sup>、飯田 肇<sup>4)</sup>

## 1. はじめに

立山をはじめとする北アルプス山岳地帯の環境には未知の部分が多い。そのような山岳地域の環境形成には降水が深く関わっており、降水の化学組成を知ることが重要である。日本海沿岸の各地では、北西季節風が強まる冬季から春季にかけてアジア大陸から長距離輸送される化学物質が増加することが知られている (Satake and Yamane, 1992; 赤田ら, 2002)。これらの長距離輸送された物質が山岳地の積雪にも含まれているのか、含まれているならば山岳環境に対してどの様に影響するのかということを解明する上で、冬季山岳地の降水の化学組成は多くの関心を集めてきた。

気象的・地理的な条件から、冬季山岳地の降水を連続的に採取することはきわめて困難である。しかし、標高が高い山岳地帯では、降雪は融雪期を迎えるまで低温の環境下、積雪として融けずに保存される。このように融解を経ない積雪は、地面から表面に向かって、晩秋から初春までの、一冬を通した降水の連続試料として用いることができる。このため、例えば立山室堂平では、融雪期以前の積雪を連続的に採取して物理的・化学的に分析する研究が長年にわたって行われている (中川ら, 1976; 日下部・佐竹, 1982; 木戸ら, 1997; 長田ら, 2000)。しかし、立山以外の山岳地における化学成分の鉛直分布に関する研究は少なく、山形蔵王 (柳澤ら, 1996) など少数の例を見るに過ぎない。

本研究では、冬季北アルプス周辺の化学物質の輸送状況を調べるため、「積雪を冬季降水の連続試料として用いる」方法を応用し、北アルプスに対して北西季節風の風上に位置する立山山麓、山脈をまたいで風下に位置する白馬岳八方尾根、さらには山脈南端の内陸部に位置する西穂高岳の3箇所において、ほぼ同時期に積雪を採取し、化学組成の鉛直分布を比較した。複数地点間の積雪の化学組成を比較する研究は、白山周辺 (Watanabeら, 1986)、立山室堂平と富山市

(篠田, 1999)、西穂高岳と利賀村 (對馬・平田, 1999) などの例がある。しかし、立山-白馬岳-穂高岳という北アルプス全域にわたる広範囲の山岳積雪について、化学組成の分布を調べた例は本研究がはじめてである。

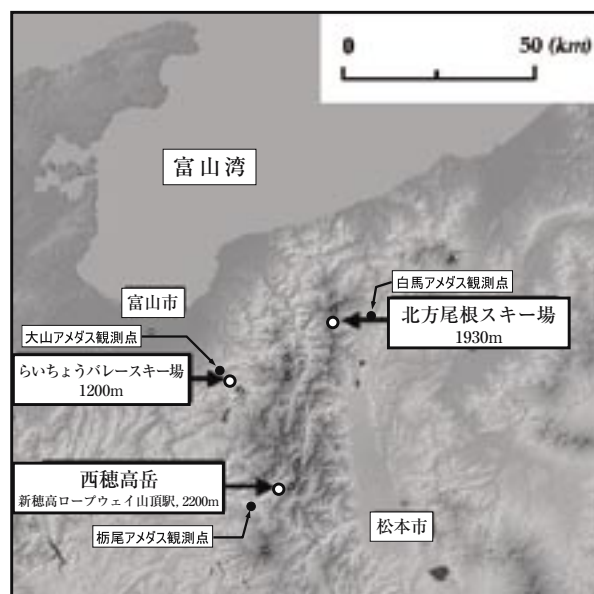


図1 試料採取地点

## 2. 研究の方法

北アルプス山岳地帯における、冬季降水中の化学成分の分布状況を知るため、2002年3月に、北アルプス周辺の3地点 (図1) において、融雪期以前の積雪層の断面観測を行い、積雪試料の採取を行った。採取日時および地点は以下の通りである。

(1) 富山県らいちょうバレースキー場上部 (海拔1200m)、2002年3月14日: 北アルプス中部の立山山麓に位置し、北アルプスの山脈から見て冬季北西風の風上側である。以下単に「らいちょうバレー」と記述する。

(2) 長野県白馬八方尾根スキー場上部 (1800m)、

1) 富山大学大学院理工学研究科生命環境科学専攻 2) 富山大学理学部生物圏環境科学科 3) 富山大学極東地域研究センター  
4) 立山カルデラ砂防博物館

2002年3月16日：北アルプス北部の唐松岳八方尾根に位置し、北西風の風下側である。以下「八方尾根」と記述する。

(3) 岐阜県新穂高ロープウエー山頂駅 (2200m)、2002年3月20日：北アルプス南部の西穂高岳千石尾根に位置し、3地点の中では最も内陸の地点である。以下「西穂高岳」と記述する。

各地点では、なるべくその地域の積雪深を代表すると思われる平坦な場所で、かつ周囲の樹木・建造物・人の侵入による攪乱が無いと判断される場所をえらび、地面に達する雪壕を作成した。雪壕の壁面を積雪層の序列が乱れないように整形し、積雪の状態の観察と試料採取を行った。試料は高さが3cmの箱形サンプラーを用いて、3cm毎に採取した。

採取した試料は密閉した容器に入れ、温度上昇による微生物の繁殖で化学組成が変化することを防ぐ為、融解しないように低温の状態を持ち帰った。実験室でこれを融解した後、イオンクロマトグラフィ法（陰イオン：Metrohm社製 Compact IC761、陽イオン：東曹製 IC-8010）により化学組成を測定した。測定を行ったイオン種は、陽イオン： $\text{Na}^+$ ・ $\text{NH}_4^+$ ・ $\text{K}^+$ ・ $\text{Mg}^{2+}$ ・ $\text{Ca}^{2+}$ 、陰イオン： $\text{F}^-$ ・ $\text{Cl}^-$ ・ $\text{NO}_3^-$ ・ $\text{SO}_4^{2-}$ の計9種で、測定精度は得られた濃度に対して $\pm 5\%$ 程度である。また、pH計（トーア社製 HM-26S）を用いて水素イオン濃度の測定も行った。

### 3. 結果と考察

#### 3-1. 積雪の断面観測

図2に各地点の積雪断面構造を概略で示した。細かい層の境界は省略した。

海拔1200mのらいちょうバレースキー場の積雪層は、表層部 (300-282cm) と底部 (85cm以下) を除いて大部分がしまりゆき層から成っていた。雪温は全層にわたって $-0.3\sim 0^\circ\text{C}$ 程度であり、融解が始まる直前の状態だったと思われるが、少なくとも融解水の影響を受けていないしまりゆき層の部分では、化学組成の変化が起こっていないと考えられる。

表層部 (300-282cm) と底部 (85cm以下) にはざらめゆき層が見られた。地面から数cm程度の部分は地温による融解があるが、それよりも上の層は、気温が高かった時期に積雪層の一部が融解したことによってざらめゆき化したと思われる。しかし、中間部には約2mに及ぶ融解していないしまりゆき層があ

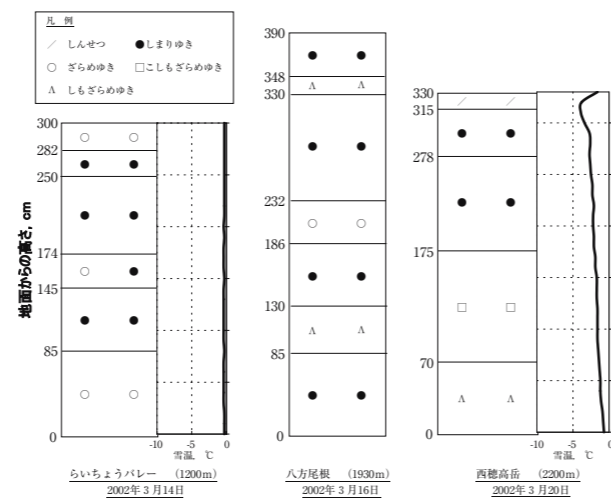


図2 各観測地点での積雪構造図

り、表層部の融解水が積雪層全体に浸透するほどの強い融雪が起こっていなかったと考えられる。また、底部のざらめゆき層は気温が高かった初冬の時期に形成された積雪層であろう。これらのざらめゆき層は、融解水が流下することによって化学組成が変動している可能性がある。しかし、4月以降の融雪期に起こるような、非常に強い融解によって化学組成が一様に均されていなければ、少なくとも変動のパターンを調べるための試料にはなり得ると考えられる。

海拔1930mの八方尾根、2200mの西穂高岳の積雪は、高い標高による低温を反映して、ほとんど融解の痕跡が無かった。西穂高岳の雪温は $-3.9\sim -0.6^\circ\text{C}$ と全層にわたり零下を示し、降雪時の化学組成をほぼ完全に保存しているといえよう。一方、八方尾根 (海拔1930m) においては雪温の測定を行わなかったが、白馬村 (703m) のアメダス観測地点の日平均気温に高度補正 ( $-6.5^\circ\text{C}/1000\text{m}$ ) を行い、観測地の気温が白馬村よりも約 $8^\circ\text{C}$ 低いと仮定して、日平均気温を推定した。その結果、八方尾根の観測地点の推定日平均気温は、2001年12月から観測を行った3月16日までの間、 $-15.8\sim -2.0^\circ\text{C}$ と常に零下であり、積雪に強い融解があったとは考えられない。したがって、八方尾根の積雪もほぼ降雪時の化学組成を保存しているといえよう。

#### 3-2. 各地点の降水量

冬季の日本は北西季節風の影響下にあり、大陸からの吹き出しによって日本海で生成された雪雲が、北アルプスの斜面を上昇する過程で大量の降雪をもたらす。北アルプスを越えた雪雲はその水蒸気の大部分を

失い、乾燥した気塊となって太平洋側を下る。試料採取を行った3地点はどれもこのような降雪機構の支配下にあると考えられ、3地点のうち、らいちょうバレーと西穂高岳は北アルプスから見て季節風の風上側にあり、八方尾根は風下側である。

図3に、それぞれの地点に最も近い気象庁アメダス観測点の日降水量 (2001年12月-2002年3月) を示した。大山の観測点はらいちょうバレースキー場の北西およそ5km、白馬観測点は八方尾根の東およそ10km、栃尾観測点は西穂高岳の南東およそ10kmの地点である (図1)。3地点を比較すると、降水量そのものには差があるが、降水があった日の対応関係は非常に良い。このことから、山脈をまたいで50km程度の離れた各地点で風上側から順次、同一の雲から降水があったと考えられる。

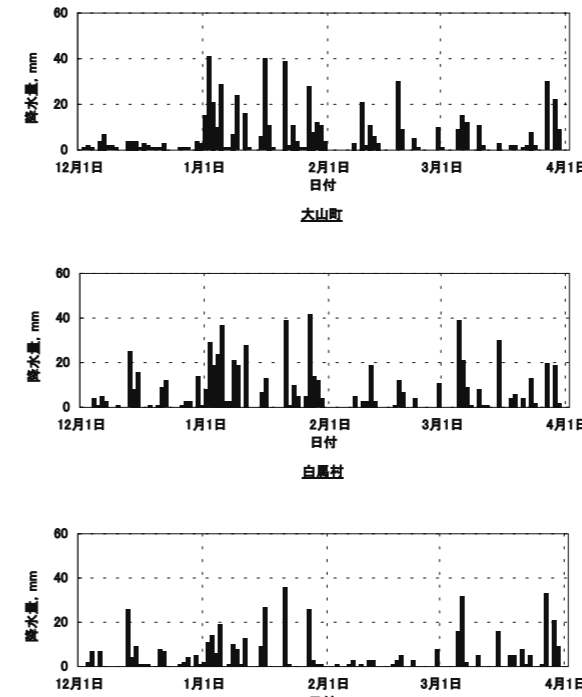


図3 白馬村・栃尾・大山町の降水量 (2001-2002年冬期)

#### 3-3. 化学成分の分布情況

各地点における積雪の化学成分の鉛直プロファイルを図4 (らいちょうバレー)・図5 (八方尾根)・図6 (西穂高岳) に示す。また、最大・最小・平均値を表に示す。 $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度は、海水中の $\text{Na}^+$ の存在比から求めた非海塩由来 (nss : Non Sea Salt) 濃度を示した。

各化学成分の鉛直プロファイルを類似したものでどうして区分すると、海塩に起源を持つと考えられ

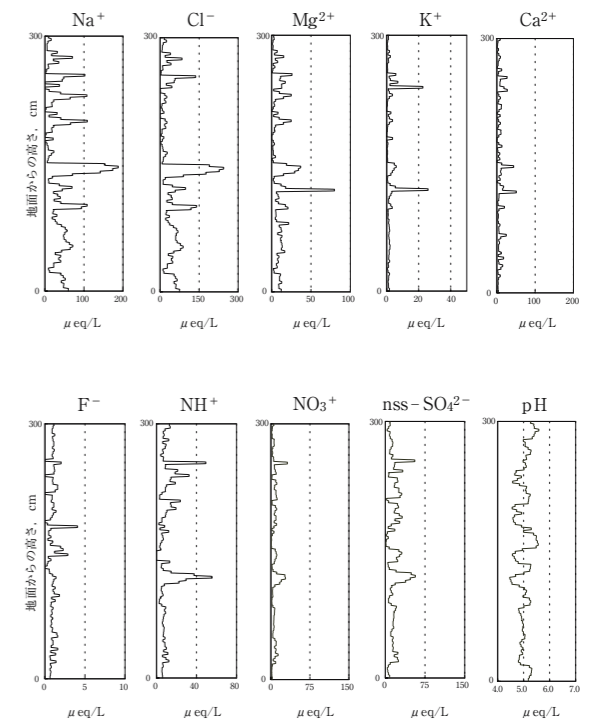


図4 2002年3月14日 立山雷鳥バレー積雪の化学成分濃度およびpH

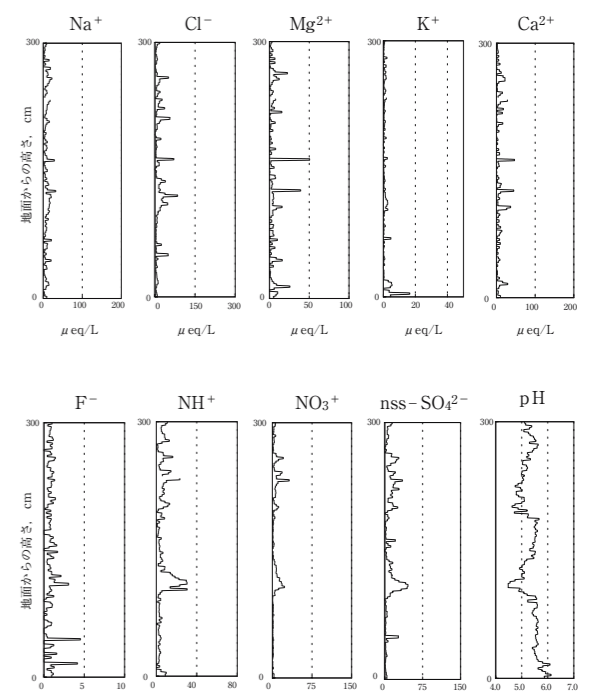


図5 2002年3月16日 八方尾根積雪の化学成分濃度およびpH

る $\text{Na}^+$ ・ $\text{Cl}^-$ ・ $\text{Mg}^{2+}$ 、土壌に起源を持つと考えられる $\text{K}^+$ ・ $\text{Ca}^{2+}$ ・ $\text{F}^-$ 、人為的汚染成分と考えられる $\text{NO}_3^-$ ・ $\text{SO}_4^{2-}$ ・ $\text{NH}_4^+$ という3つのパターンが認められた。以下にそれぞれの特徴を述べる。

表 各地点の化学成分の最大・最小・平均値

地点名	イオン種	μeq/L										pH
		Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	NH <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	nss-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		
雷鳥バレー	最大値	188	244	80	26	50	4	55	31	57	5.6	
	最小値	0	1	0	0	0	0	0	1	1	4.5	
	平均値	38	42	9	2	8	1	10	7	16	5.0	
白馬岳	最大値	31	84	50	16	46	5	30	32	46	6.1	
	最小値	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.5	
	平均値	9	12	4	1	6	1	6	4	9	5.5	
西穂高岳	最大値	67	57	50	45	192	8	75	112	109	6.8	
	最小値	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4.4	
	平均値	10	11	8	3	16	1	13	11	27	6.0	

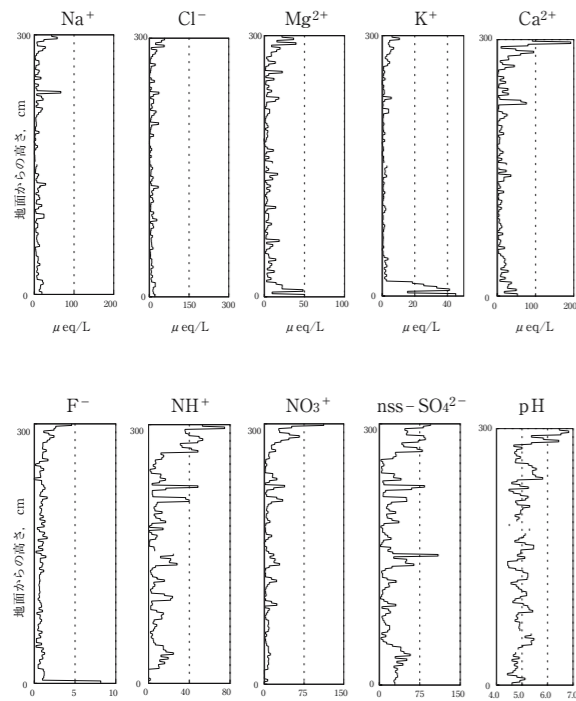


図6 2002年3月20日 西穂高岳積雪の化学成分濃度およびpH

(1) 海塩成分

海塩を起源に持つと考えられるNa<sup>+</sup>・Cl<sup>-</sup>・Mg<sup>2+</sup>は、海岸からの距離が最も近いらいちょうバレーで高い濃度を示した。内陸に位置する八方尾根・西穂高岳の濃度は低かった。Na<sup>+</sup>を例にとると、雷鳥バレーの平均値が38μeq/Lであるのに対し、八方尾根は8μeq/L、西穂高岳は10μeq/Lと、その濃度は約4倍も異なる。このように、海塩起源の化学成分は海岸に近いほど降水中に多く含まれ、内陸部や山脈の風下側では減少するという傾向が顕著に見られた。しかし、西穂高岳でのMg<sup>2+</sup>の鉛直プロファイルはむしろCa<sup>2+</sup>などの土壌成分に近い。この点については次項で述べる。

(2) 土壌成分

土壌を起源に持つと考えられるK<sup>+</sup>・Ca<sup>2+</sup>・F<sup>-</sup>では、Ca<sup>2+</sup>の濃度が西穂高岳において高い値を示した（平均値は、らいちょうバレー：8μeq/L、八方尾根：6

μeq/L、西穂高岳：18μeq/L）。積雪中のCa<sup>2+</sup>は中国大陸から飛来する黄砂の指標として用いられる。また、Ca<sup>2+</sup>の鉛直分布は次項で述べるnss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>（多くは中国などアジア大陸起源）の分布と良い変動パターンの一致を示している。したがって、この結果は西穂高岳には他の地点に比べてより多くの黄砂が飛来していることを示唆している。中国大陸より長距離を輸送されてくる黄砂は、上空2000~4000m附近にその濃度の極大をとることが多い（岩坂ら,1991）。西穂高岳は3地点の中では最も内陸に位置するが標高は最も高く、また、日本海から西穂高岳に至る北西風の経路上には2000mを越すような高山がない。そのため、同じ風上側に位置しているらいちょうバレーと比べてより強く、高々度の大気に含まれる黄砂の寄与を受けていたと考えられる。一方、山脈の風下に位置する八方尾根では、雪雲が山脈を越える際に多くのCa<sup>2+</sup>を降水と共に失ってしまうため、濃度が低下したのであろう。Ca<sup>2+</sup>と同様の傾向はK<sup>+</sup>にも見られる。

Mg<sup>2+</sup>は海塩成分であると同時に、土壌を構成する成分のひとつでもある。西穂高岳のMg<sup>2+</sup>の鉛直プロファイルはCa<sup>2+</sup>のそれともよく一致するが、このことは西穂高岳のMg<sup>2+</sup>は長距離輸送されてきた土壌からの寄与が多いことを示唆している。さらに、土壌起源のグループのうちF<sup>-</sup>のプロファイルは人為的汚染成分（例えばnss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の鉛直プロファイル；後述）にも変動パターンが近い。F<sup>-</sup>は中国での石炭燃焼時にHFとして放出されると指摘されているが（坂本,1994）、F<sup>-</sup>の起源は土壌以外に、このような人為的起源があると考えられる。

(3) 人為的汚染成分

自動車の排気ガスや工業生産の排煙など、人為的汚染に起源を持つNO<sub>3</sub><sup>-</sup>・nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>・NH<sup>+</sup>は、いずれもらいちょうバレーと西穂高岳で高く、八方尾根で低かった。nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度はらいちょうバレーの平均値が16μeq/L、八方尾根が9μeq/L、西穂高岳が27μeq/Lという値をとり、西穂高岳で特に高い値を示した。これはNH<sup>+</sup>とNO<sub>3</sub><sup>-</sup>についても同様である。Toyamaら（2003）は西穂高岳積雪中のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>・nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>が中国・ロシアなどのアジア大陸から輸送されてきたものであることを明らかにしたが、黄砂の主成分であるCa<sup>2+</sup>と同様に、アジア大陸から輸送されてくるこれらの酸性物質が、最も内陸部である西穂高岳で最も高い濃度を持つことはきわめて興味深い。西穂高岳はもっとも

内陸に位置するが、海岸からの北西風の経路上には2000mを越える高山が存在せず、大陸から高々度を長距離輸送されてきたnss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>やNO<sub>3</sub><sup>-</sup>は、海岸から見て最初の2000m超の高山である西穂高岳にもっとも多く沈着したと考えられる。

NH<sup>+</sup>は土壌中の有機物が分解した際に生じるものが起源であるとも考えられるが、その鉛直プロファイルはnss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>やNO<sub>3</sub><sup>-</sup>によく類似していることから、人為的汚染の寄与が高いと思われる。NH<sup>+</sup>も西穂高岳で高い値を示したが、その濃度はらいちょうバレーの平均値が10μeq/L、八方尾根が6μeq/L、西穂高岳が13μeq/Lという値をとり、nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>に見られたような極端な差（例えば、らいちょうバレーと西穂高岳のnss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は2倍近い差があるのに対し、NH<sup>+</sup>は1.3倍程度）が見られなかった。このことは、NH<sup>+</sup>の輸送高度が比較的低いことを示していると考えられ、その起源は近隣地域における人間活動であると予想される。

(4) pH

3地点の平均pH値はらいちょうバレー5.0、八方尾根5.3、西穂高岳5.0と、いずれも5.6以下の値を示した。pHの鉛直分布はNO<sub>3</sub><sup>-</sup>・SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>が高濃度になる層で低い値をとり（例えば：らいちょうバレーの120~140cm付近、八方尾根の140cm付近、西穂高岳の150cm付近など）、酸性物質が積雪のpHを低下させていることがわかる。また、もっとも酸性物質が少なかった八方尾根ではpH値が高かった。しかし、もっとも酸性物質が多かった西穂高岳と、西穂高岳よりも酸性物質が少なかったらいちょうバレーのpH値は大差

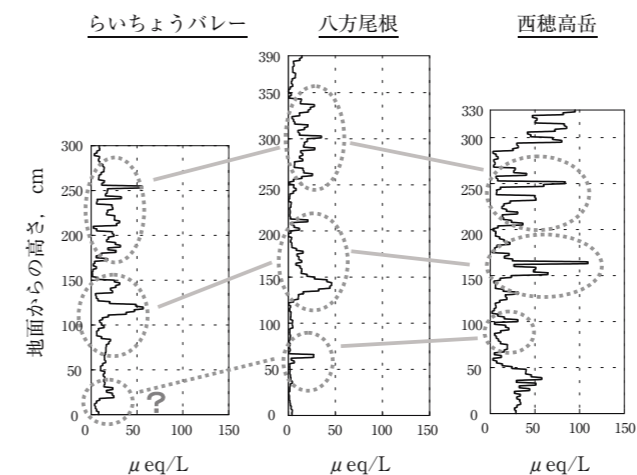


図7 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度の地点間での比較

がない。西穂高岳は黄砂の指標となるCa<sup>2+</sup>濃度が高かったが、西穂高岳では酸性物質がおおく飛来したものの黄砂に含まれるCaCO<sub>3</sub>によって中和され、pH値が低下しなかったと考えられる。例えば、西穂高岳積雪の表層付近ではSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>とCa<sup>2+</sup>が同時に高いピークを示しているが、この時のpHは6.0以上の高い値を示している。

3-4. 化学成分鉛直分布の対応

各化学成分の鉛直プロファイルは、それぞれの地点間でその変動パターンに一致が見られた。特にその一致が明らかであると思われるSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度の鉛直分布を図7に示した。点線で囲ってあるピーク群がそれぞれ対応すると考えられ、線でつないで示してある。らいちょうバレー積雪の30cm付近のピークはざらめゆき層にあるため、融解水の影響があると考えられるが、ピークのシグナルは保存されていた。

図3に示した降水量の変動にも一致が見られたが、化学組成の鉛直分布にも一致があることから、北アルプスの山脈をまたいで50km程度離れた各地点はほぼ同一の降水機構に支配されており、そこに飛来する化学物質の輸送機構もほぼ同一のものであると考えられる。

4. まとめ

ほぼ同時期にらいちょうバレー・白馬岳・西穂高岳の3箇所を積雪を地面から雪面まで連続的に採取し、化学成分を分析した結果、以下のような知見を得た。

- 1) 北アルプスから見て北西風の風上側にある地点の積雪は化学成分の濃度が高く、風下側で低いという空間分布を示した。このことは、雪雲が北アルプスの山脈を越えるときに、上空にある化学物質を降雪と共に降下させ、風下に向かうにしたがって減少させているためだと考えられる。
- 2) 西穂高岳はもっとも内陸の地点ながら、化学成分の濃度はもっとも高かった。高々度を輸送されてくる酸性物質や黄砂は、内陸部においても標高の高い地点に強く影響を与えている。
- 3) 北アルプスの山域をほぼカバーする50km程度離れた地点間でも、化学組成鉛直プロファイルの変動パターンにはある程度的一致があった。冬季の北アルプスはほぼ同一の降水機構に支配されており、各地点の降水の化学組成もその影響を受けている。

今後、北西風のより風下に位置する長野県・山梨

県の山々で同様の積雪調査を行い、これら北アルプス高山の積雪と比較することで、化学物質が内陸に向かってどのように降下していくかを知ることができると思われる。また、酸素・水素の同位体比を同時に測定し、積雪の堆積時期を推定する(遠山ら,2005)ことで、気象条件と化学物質の起源・輸送量の関係をより詳細に明らかにすることができるだろう。

## 参考文献

- 赤田尚史・柳澤文孝・本山玲美・川端明子・上田晃 (2002) : 日本の湿性降下物に含まれる非海塩性硫酸イオンの硫黄同位体比、雪氷、64巻2号、173-184.
- 岩坂泰信・今須良一・箕浦宏明・長屋勝博・荒尾公雄・甲斐憲次 (1991) : 黄砂のリモート・センシング、大気水圏の科学 黄砂、名古屋大学水圏科学研究所編、古今書院、37-70.
- 木戸瑞佳・長田和雄・矢吹裕伯・飯田肇・瀬古勝基・幸島司郎・對馬勝年 (1997) : 立山・室堂平における積雪層の堆積時期の推定、雪氷、59巻3号、181-188.
- 気象庁 (2006) : 電子閲覧室、<http://www.data.kishou.go.jp/>
- 日下部実・佐竹洋 (1983) : 北アルプス内蔵助沢万年雪の安定同位体比とトリチウム濃度、1983年度日本地球化学会年会講演要旨集、55.
- 中川正之・川田邦夫・岡部敏夫・清水弘・秋田谷英次 (1976) : 立山の積雪の研究、雪氷、38巻4号、1-8.
- 長田和雄・木戸瑞佳・飯田肇・矢吹裕伯・幸島司郎・川田邦夫・中尾正義 (2000) : 立山・室堂平の春季積雪に含まれる化学成分の深度分布、雪氷、62巻1号、3-14.
- 坂本和彦 (1994) : 世界の酸性雨の現状 東アジア、気象研究ノート (酸性雨II)、182、15-32.
- Satake, H., and Yamane, T., (1992) : Deposition of non-sea salt sulfate observed at Toyama facing the sea of Japan for the period of 1981-1991, *Geochem. J.*, 26, 299-305.
- 篠田裕美 (1999) : 立山山岳地帯における降水・積雪の化学組成と同位体比,富山大学生物圏環境科学科平成10年度卒業論文.
- Toyama, K., Tsuruta, M., Satake, H., Takai, G., and Kawada, K., (2003) : Long-distance transportation of contaminants from the Asian Continent in snow cover of central Japan high mountain region, *Geochemica et Cosmochemica Acta, Special Supplement, Abstracts of the 13th V.M. Goldschmidt Conference*, 488.
- 遠山和大・鈴木悟郎・佐竹洋・川田邦夫・飯田肇 (2005) : 酸素同位体比を用いた山岳地積雪の堆積時期推定、雪氷、67巻4号、319-330.
- 對馬勝年・平田桂子 (1999) : 新穂高ロープウェー山頂の積雪と富山県利賀村積雪の化学特性,寒地技術シンポジウム'99寒地技術論文・報告集, 15, 816-823.
- Watanabe, O., Kanamori, N., Sugimoto, A., Iida, H., and Higuchi, K., (1986) : Regional Characteristics of Snow Cover in the Mountain Region of Central Japan, *J. Earth Sci. Nagoya Univ.*, Vol. 34, 67-108.
- 柳澤文孝・中川望・安部博之・矢野勝俊 (1996) : 山形県蔵王の積雪と着氷の化学組成、雪氷、58巻5号、393-403.

## 【要 旨】

冬季北アルプス周辺の化学物質の輸送状況を調べるため、北アルプスをまたいで位置する3地点(立山らいちょうバレースキー場上部・白馬八方尾根・西穂高岳千石尾根)において2002年3月に積雪を採取し、積雪中の化学組成の鉛直分布を比較した。その結果、以下のような知見を得た。1) 化学成分の濃度は、北西季節風の風上側にあるらいちょうバレー・西穂高岳で高く、風下側の八方尾根で低いという空間分布を示した。雪雲が北アルプスの山脈を越えるときに、上空にある化学物質が降雪と共に降下・減少していったと見られる。2) 西穂高岳の化学成分濃度が最も高く、高々度を輸送されてくる酸性物質や黄砂は、内陸部においても標高の高い地点に強く影響を与えている。3) 約50km離れた3地点間の鉛直分布はある程度の一致があり、冬季北アルプス周辺の化学物質の輸送はほぼ同一の機構に支配されている。